УДК 621.311.223-52

Л.М. ЛЮБЧИК, д-р техн. наук,
Г.Л. ГРИНБЕРГ, канд. техн. наук, ***ЧАН ЗУНГ ЧИНЬ***

КОРРЕКЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЕТА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭНЕРГОБЛОКА В УСЛОВИЯХ НЕТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Розглядається задача корекції обчислюваних техніко-економічних показників енергоблоків з урахуванням похибок вимірювань технологічних параметрів. На основі використання апріорної статистичної інформації про вимірювані параметри і погрішності вимірювань запропонована методика корекції лінеарізованих формул обчислення показників і знайдені оптимальні лінійні перетворення, що забезпечують корекцію.

Введение. Одной из важнейших функций автоматизированных информационно-управляющих систем энергоблоков тепловых и атомных электростанций является вычисление разнообразных технико-экономических показателей (ТЭП), характеризующих экономичность, надежность и долговечность энергетического оборудования в процессе его эксплуатации. Указанные вычисления связаны с необходимостью обработки измерительной информации о текущих значениях технологических параметров в реальном масштабе времени. Так, например, вычисление КПД парогенератора осуществляются на основе текущих данных о расходе, температуре и давлении первичного и вторичного пара [1]. При этом расчет ТЭП осуществляются, как правило, с помощью достаточно простых формул пересчета текущих измерений технологических параметров в значения искомых показателей и в принципе не вызывают особых затруднений. Однако существенным при этом является вопрос о точности определения вычисляемых показателей, поскольку измерение технологических параметров, как правило, не точны и сопровождаются значительными погрешностями. Точность определения вычисляемых ТЭП можно существенно повысить за счет соответствующей коррекции вычислений, под которой будем понимать определенное функциональное преобразование значений показателей, вычисленных без учета погрешностей измеряемых параметров. Выбор оптимального преобразования определяется, в свою очередь, на основе базовых расчетных формул с учетом имеющейся априорной статистической информацией об измеряемых технологических параметрах, входящих в расчетные формулы ТЭП.

В настоящей работе приводиться аналитическое решение задачи коррекции вычисляемых ТЭП, заданных в виде непрерывных функциональных зависимостей от текущих значений измеряемых технологических параметров.

Постановка задачи. Рассмотрим задачу коррекции расчета ТЭП, определяемого функциональной зависимостью:

$$Y = f(X) = f(x_1,\ldots,x_n), \tag{1}$$

где Y - искомый показатель, $X = (x_1,\ldots,x_n)^{\mathrm{T}}$ – вектор технологических параметров, т – знак транспонирования.

Представим расчетную зависимость (1) в линеаризованном виде:

$$Y = f(X_0) + D^{\mathrm{T}}\tilde{X} = D^{\mathrm{T}}(\tilde{X}_0 + \xi), \qquad D = (\partial f/\partial x_1,\ldots,\partial f/\partial x_n)^{\mathrm{T}}\Big|_{X=X_0}, \tag{2}$$

где X_0 – вектор номинальных значений технологических параметров, $\tilde{X}$ - вектор измеряемых отклонений от номинальных значений, представляющий собой сумму фактических значений отклонений $\tilde{X}_0$ и погрешностей измерений $\xi = (\xi_1,\ldots,\xi_n)^{\mathrm{T}}$. При этом вычисление значений ТЭП осуществляется путем скалярного умножения вектора измерений отклонений параметров $\tilde{X}$ и вектора коэффициентов пересчета $D^{\mathrm{T}} = (d_1,\ldots,d_n)$.

Будем считать, что случайные векторы $\tilde{X}_0$ и ξ взаимно независимы и распределены в соответствии многомерными нормальными законами:

$$\mathbf{M}\{\tilde{X}_0\} = \bar{X}_0,\ \mathbf{M}\{(\tilde{X}_0 - \bar{X}_0)(\tilde{X}_0 - \bar{X}_0)^{\mathrm{T}}\} = S_X,\ \mathbf{M}\{\xi\} = 0,\ \mathbf{M}\{\xi\xi^{\mathrm{T}}\} = S_\xi. \tag{3}$$

где $\overline{X}_0$ – априорное значение математического ожидания вектора отклонения измеряемых параметров от номинальных значений, S_X, S_ξ – невырожденные ковариационные матрицы векторов отклонений и погрешностей измерений соответственно.

Точность определения вычисляемого показателя будем характеризовать дисперсией его отклонения от фактического значения $Y_0 = f(X_0) + D^{\mathrm{T}}\tilde{X}_0$:

$$\sigma^2_{Y-Y_0} = \mathbf{M}\{(Y - Y_0)^2\} = D^{\mathrm{T}} S_\xi D. \tag{4}$$

Примем в качестве скорректированного значения вычисляемого показателя величину Ŷ, вычисляемую по формуле:

$$\hat{Y} = f(X_0) + D^{\mathrm{T}}\bar{X}_0 + D^{\mathrm{T}} H(\tilde{X} - \bar{X}_0), \tag{5}$$

где Н – квадратная матрица, определяющая правило коррекции. Тогда задача коррекции сводится к выбору оптимальной матрицы преобразования из условия минимизации дисперсии скорректированного вычисляемого ТЭП:

$$H^* = \arg\min \sigma^2_{Y-Y_0} = \arg\min \mathrm{M}\{(\widehat{Y} - Y_0)^2\}. \qquad (6)$$

Коррекция статических измерений. Найдем ошибку вычисления скорректированного показателя. Из (5) следует, что

$$\widehat{Y} - Y_0 = D^{\mathrm{T}}(H - I_n)\tilde{X}^0 + D^{\mathrm{T}} H \xi, \qquad (6)$$

где $\tilde{X}^0 = \tilde{X} - \bar{X}_0$ – центрированное значение вектора измеряемых отклонений технологических параметров, I_n – единичная матрица. Тогда дисперсия скорректированного вычисляемого показателя равна:

$$\sigma^2_{\tilde{Y}-Y_0} = D^{\mathrm{T}}(H - I_n) S_X (H - I_n)^{\mathrm{T}} D + D^{\mathrm{T}} H S_\xi H^{\mathrm{T}} D, \qquad (7)$$

Вводя обозначение $\tilde{D} = H^{\mathrm{T}} D$, перепишем формулу (7) в виде:

$$\sigma^2_{\tilde{Y}-Y_0} = \tilde{D}^{\mathrm{T}}(S_X + S_\xi)^{\mathrm{T}} \tilde{D} - 2\tilde{D}^{\mathrm{T}} S_X D + D^{\mathrm{T}} S_X D. \qquad (8)$$

Найдем оптимальное значение матрицы коррекции Н* из условия минимизации дисперсии погрешности вычисления ТЭП (8). Находя градиент $\sigma^2_{\tilde{Y}-Y_0}$ по вектору $\tilde{D}$, и приравнивая его к нулю, получаем систему нормальных уравнений $(S_X + S_\xi)\tilde{D} - S_X D = 0.$ Из полученной системы следует, что оптимальное значение $\tilde{D}^* = (S_X + S_\xi)^{-1} S_X D$ и, соответственно,

$$H^{*\mathrm{T}} = (S_X + S_\xi)^{-1} S_X. \qquad (9)$$

Очевидно, что оптимальная матрица коррекции Н* является симметрической и для нее справедливо тождество $H^* - I_n = -S_\xi (S_X + S_\xi)^{-1}.$ При этом минимальное значение дисперсии оценки ТЭП, соответствующее оптимальной матрице коррекции Н* (9), равно:

$$\sigma^2_{Y^*-Y_0} = D^{\mathrm{T}} S_\xi \Phi S_X \Phi S_\xi D + D^{\mathrm{T}} S_X \Phi S_\xi \Phi S_X D, \tag{10}$$

где $\Phi = (S_X + S_\xi)^{-1}$. Таким образом, как следует из (9), оптимальное значение матрицы коррекции H* определяется соотношением между априорными ковариационными матрицами векторов отклонений измеряемых параметров и погрешностей измерений.

Пример. Для пояснения полученных результатов рассмотрим частный случай, когда введенные выше ковариационные матрицы имеют вид $S_X = \sigma_X^2 I_n$, $S_\xi = \sigma_\xi^2 I_n$, что соответствует равноточным измерениям параметров, имеющих одинаковое априорное рассеяние. Тогда из (9) следует, что $H^* = h^* I_n$, $h^* = -\sigma_X^2(\sigma_X^2 + \sigma_\xi^2)^{-1} = 1/(1+\alpha)$, где параметр $\alpha = \sigma_\xi^2 / \sigma_X^2$ эквивалентен отношению «шум/сигнал». Очевидно, что при этом

$$\sigma^2_{\tilde{Y}^*-Y_0} = \|D\|^2 \sigma_X^2 \sigma_\xi^2 (\sigma_X^2 + \sigma_\xi^2)^{-1} = \|D\|^2 \sigma_\xi^2 (1+\alpha)^{-1}. \tag{11}$$

В предельных случаях при малом уровне помех $\sigma_\xi^2 \ll \sigma_X^2$ имеем $h^* \approx 1$ и осуществлять коррекцию не имеет смысла, при высоком уровне помех $\sigma_\xi^2 \gg \sigma_X^2$ соответственно $h^* \approx 0$ и в качестве оценки ТЭП целесообразно брать априорное математическое ожидание $\hat{Y} = f(X_0) + D^{\mathrm{T}} \bar{X}_0$.

В общем случае предложенная оценка ТЭП приобретает вид:

$$\hat{Y}^* = f(X_0) + (1-h^*) D^{\mathrm{T}} \bar{X}_0 + h^* D^{\mathrm{T}} \tilde{X}, \tag{12}$$

т.е. оптимальное значение вычисляемого показателя есть взвешенная сумма его априорного среднего значения и значения, вычисляемого по фактическим измерения. Относительный выигрыш по точности при этом равен:

$$\delta\sigma^2_{\tilde{Y}-Y_0} = \frac{\sigma^2_{\tilde{\tilde{Y}}-Y_0} - \sigma^2_{\tilde{\tilde{Y}}^*-Y_0}}{\sigma^2_{\tilde{\tilde{Y}}-Y_0}} = \frac{\alpha}{1+\alpha} \tag{13}$$

и тем выше, чем больше отношение «шум/сигнал» *α*.

Коррекция динамических измерений. Реализация предложенного подхода определяется способами вычисления ковариационных матриц, входящих в выражение для матрицы коррекции (9). Особый практический интерес представляет случай так называемых косвенных измерений, когда отклонения технологических параметров являются реализациями случайных процессов и измерению доступны лишь их линейные комбинации.

Примем, что модель формирования отклонений технологических параметров и измеряемых переменных задается так называемой моделью формирующего фильтра, описываемого дискретной динамической системой:

$$\tilde{X}_0(n+1) = A\tilde{X}_0(n) + W(n), \quad Z(n) = C\tilde{X}_0(n) + V(n), \tag{14}$$

где $Z(n)$ – вектор доступных измерений, $W(n)$ – вектор случайных воздействий на формирующий фильтр, $V(n)$ – вектор погрешностей измерений, n - номер измерения. Матрицы A и C, задающие динамику изменения отклонений технологических параметров и структуру формирования измерений, будем считать известными.

Будем считать, что

$$\mathbf{M}\{W\} = \overline{W},\ \mathbf{M}\{(W-\overline{W})(W-\overline{W})^{\mathrm{T}}\} = Q_W,\ \mathbf{M}\{V\} = 0,\ \mathbf{M}\{VV^{\mathrm{T}}\} = Q_V. \tag{15}$$

Тогда из соотношений (14), (15) следует, что априорные статистические характеристики вектора отклонений $\tilde{X}_0$, а именно, $\overline{X}_0(n), \quad S_X(n)$, являются нестационарными и определяются разностными уравнениями:

$$\overline{X}_0(n+1) = A\overline{X}_0(n) + \overline{W}(n), \quad S_X(n+1) = AS_X(n)A^{\mathrm{T}} + Q_W(n). \tag{16}$$

В качестве косвенных измерений отклонений технологических параметров примем линейную оптимальную оценку $\hat{X}_0(n)$, определяемую с помощью дискретного динамического наблюдателя [2]:

$$\hat{X}_0(n+1) = A\hat{X}_0(n) + L(Z(n - C\hat{X}_0(n)) + \overline{W}(n), \quad \hat{X}_0(n) = \overline{X}_0, \tag{18}$$

где L – матрица коэффициентов усиления динамического наблюдателя. При этом погрешность косвенных измерений, совпадает фактически с ошибкой оценивания $\xi(n) = \hat{X}_0(n) - X_0(n),$ и удовлетворяет разностному уравнению:

$$\xi(n+1) = (A - LC)\xi(n) - LV(n) + W(n). \tag{19}$$

Очевидно, что оценка $\hat{X}_0(n)$ является несмещенной, а ковариационная матрица ошибки косвенных измерений задается разностным уравнением:

$$S_{\xi}(n+1)=(A-LC)S_{\xi}(n)(A-LC)^{\mathrm{T}}(n)+LQ_V L^{\mathrm{T}}+Q_W. \qquad (20)$$

Выберем матрицу коэффициентов усиления наблюдателя из условия обеспечения максимальной точности оценивания:

$$L^{*}(n)=\arg\min \operatorname{tr} S_{\xi}(n+1) \qquad (21)$$

откуда следует выражение для оптимального значения матрицы усиления:

$$L^{*}(n)=AS_{\xi}(n)C^{\mathrm{T}}(Q_V+CS_{\xi}(n)C^{T})^{-1}. \qquad (22)$$

Тогда уравнение оптимального стохастического наблюдателя, формирующие косвенные измерения, преобразуются к виду:

$$\begin{aligned}
&\widehat{X}_0(n+1)=A^{*}(n)\widehat{X}_0(n)+B^{*}(n)Z(n)+\overline{W}(n), \quad \widehat{X}_0(n)=\overline{X}_0,\\
&A^{*}(n)=A[I_n-S_{\xi}(n)C^{\mathrm{T}}(Q_V+CS_{\xi}(n)C^{T})^{-1}C], \qquad (23)\\
&B^{*}=AS_{\xi}(n)C^{\mathrm{T}}(Q_V+CS_{\xi}(n)C^{T})^{-1}.
\end{aligned}$$

Динамика ковариационной матрицы $S_{\xi}(n)$ задается разностным уравнением (20) с подставленным в него оптимальным значением $L^{*}(n)$ из формулы (22). Таким образом, уравнения (9), (20), (22), (23) задают рекуррентные формулы вычисления оптимальной матрицы коррекции $H^{*}(n)$, которая в данном случае, оказывается зависящей от времени.

Заключение. Предложенный метод позволяет существенно повысить точность вычисления ТЭП, расчетные модели которых представляют собой статические преобразования измеряемых технологических параметров, измеряемых СС существенными случайными погрешностями. Дальнейшее повышение точности можно достичь путем компенсации погрешностей, обусловленных динамическими свойствами технологического объекта и измерительных каналов [3].

Список литературы: 1. Дуэль Т.Л. Использование технико-экономической информации в интегрированных АСУ тепловых электростанций. Харьков, 2006. - 256 с. 2. Первозванский А.А. Курс теории автоматического управления.- М.: Наука, 1986. - 616 с. 3. Любчик Л.М., Дуэль Т.Л. Автоматическое определение технико-экономических показателей с учетом динамических свойств энергооборудования // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. - Харків: НТУ "ХПІ", 2004. - № 36. - С. 105-110.

Поступила в редколлегию 21.04.06.